

방전여기 KrF 레이저의 완충가스 영향에 대한 이론 해석

崔富淵·李柱熙

경희대학교 전자공학과

(1990년 2월 10일 받음)

방전여기 방식의 KrF 엑사이머 레이저의 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 방전 중의 KrF* 형성, 탈여기 및 흡수반응 등에 대한 완충가스의 영향에 관해 해석하였다. He 가스와 Ne 가스의 경우 KrF* 생성효율은 각각 7.5%, 19%였으며, KrF* 탈여기는 충전전압 30kV에서 각각 45, 30%의 비율을 차지하였다. 그러나 흡수과정에서 완충가스의 영향이 10% 이하였다.

I. 서 론

1976년 D.G. Sutton⁽¹⁾ 등에 의해 He/Kr/NF₃ 혼합 가스에서 방전여기 방식으로 KrF 레이저 발전에 최초로 성공한 이후 장치가 간단한 장치로 고효율 및 고반복의 레이저 출력을 용이하게 얻을 수 있는 장점으로 인해 반도체 소재의 정밀가공, 광화학반응, 동위원소분리 등의 다양한 응용분야에서 주목을 받고 있다.

방전여기 KrF 엑사이머 레이저는 기저상태에서 서로 강력히 반발하는 두 개의 폐각원자들이 여기상태에서 엑사이머가 형성되는 동안 직접적 전기부하 상태에 있다. 그러므로 엑사이머 동력학은 레이저 전극간의 비선형 저항, 플라즈마 dynamics, 엑사이머의 형성, 탈여기 및 흡수들의 과정을 동시에 취급해야 한다. 이와 같은 복잡한 과정의 이론적 해석을 최초로 시도한 것은 Greene 과 Brau⁽²⁾이며, 그 이후 Karasawa와 Shimauchi,⁽³⁾ Mizunami 등,⁽⁴⁾ Maeda 등⁽⁵⁾에 의한 KrF 레이저의 He/Kr/F₂와 Ne/Kr/F₂계에서 완충가스의 이론적 모델 개발 등 많은 보고가 있다. 그러나 완충가스를 He 가스와 Ne 가스를 사용할 때 KrF* 형성 전단계 및 KrF* 형성, 탈여기 등에 대한 부분의 해석이 미흡하다.

본 연구는 방전여기 UV 예비전리 KrF 레이저에서 완충가스를 He 가스와 Ne 가스를 사용할 때 각각 상태에서 방전특성, KrF* 형성, 탈여기, 흡수과정 및 이에 기여하는 레이저 기본 파라메타 등에 대하여 이론적 고찰을 하였다.

II. 시뮬레이션 코드 구성

1. 프로그램 흐름도

본 연구에서 사용한 모델의 흐름도는 그림 1과 같다. 본 모델은 E/N의 변화를 계산하기 위한 회로 방정식, 전자충돌에 의한 이온화, 여기, 탈여기 등의 반응속도상수를 계산하기 위한 볼츠만 방정식, 카이네틱스 방정식 및 광자추출 방정식으로 구성하였다. 각각의 방정식에 대한 설명은 참고문헌^(6,7,14)에 보고된 바 있다.

본 모델에서 회로 방정식, 프라즈마 카이네틱스 방정식 및 광자추출 방정식은 4계 Runge-Kutta Gill법에 의한 수직적분을 하였으며, E/N이 20% 변화할 때마다 볼츠만 방정식에서 전자와 불활성 기체와의 충돌에 의한 반응속도상수를 계산하도록 하였다. 계산시간의 절약을 위해 처음에는 회로 방정식만을 계산하고, 방전관의 절연과외 전압으로 증가하면 카이네틱 방정식과 광자추출 방정식도 함께 계산하도록 하였다. 또한 방전관의 비선형 방전저항은 수 MΩ부터 변화하는 것으로 가정하였다.

본 시뮬레이션에 사용한 컴퓨터는 VAX-11/780, NAS AS/XL V50으로 한 번 실행하는데 소모되는 CPU 시간은 각각 2시간, 150sec 정도이다.

2. 모델 정수

흐름도에서, 볼츠만 방정식 정수 중에서 Kr, Ne, He, F₂ 가스의 운동량 전달 단면적, 여기 및 이온화 단

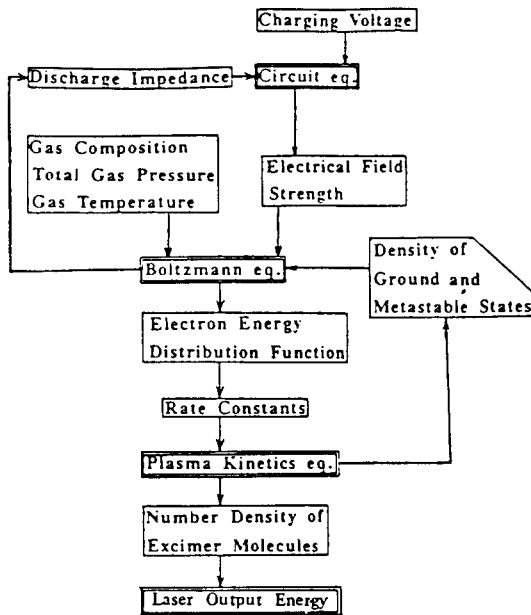


Fig. 1. Schematic diagram of UV-preionized discharge KrF laser simulation.

면적은 이미 보고된⁽⁸⁻¹⁰⁾의 데이터를 사용하였다. 프라즈마 카이네틱스 방정식의 초기값은 UV에 의하여 예비전리된 전자수 밀도 및 F⁻ 밀도를 각각 $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 와 $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 로 하였다^(11,12).

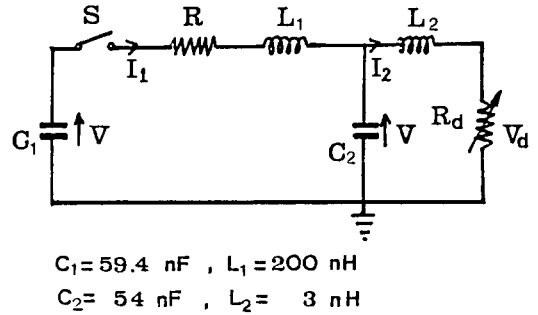
모델의 정확도는 모델에 사용하는 반응속도상수 및 흡수 단면적의 크기에 크게 좌우된다. 그러므로 지금까지 보고된 반응속도상수를 엄선하여 사용하였으며, 전자와 불활성 기체와의 탄성충돌, 비탄성충돌 및 초탄성충돌에 의한 반응속도상수는 불꽃만 방정식을 사용하여 계산하였다.

본 모델에서 사용한 유도방출 단면적은 다음 식과 같다⁽¹³⁾.

$$\sigma = \frac{1}{4\pi C\tau} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{\lambda^4}{\Delta\lambda}$$

여기서, $\Delta\lambda$ 는 스펙트럼 폭(FWHM), τ 는 자연방출 수명이다. 위의 식에 스펙트럼 폭 $\Delta\lambda$ 를 Brau 등⁽¹⁵⁾ 및 Murray 등⁽¹⁶⁾에 의한 실험치 20 \AA 을 대입하여 $\sigma = 3.6 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 로 사용하였다. 또한 KrF*(B)의 진동 완화와 KrF(X)의 해리는 순간적인 것으로 가정하였다. 광자추출 방정식을 계산하기 위하여 방전 중 방전체적의 이득과 흡수는 균일한 것으로 가정하였다.

모델에 사용한 방전여기 KrF 레이저 장치의 등가회로는 그림 2와 같다. 등가회로에서 L_1 과 R 은 C_1 에 충전



$$C_1 = 59.4 \text{ nF}, L_1 = 200 \text{ nH}$$

$$C_2 = 54 \text{ nF}, L_2 = 3 \text{ nH}$$

Fig. 2. Equivalent circuit of UV-preionized discharge KrF laser.

된 전하가 C_2 로 이송할 때, 루프의 인덕턴스 및 저항으로 각각 200 nH , 0.17Ω 이다. L_2 와 R_D 는 C_2 에 충전된 전하가 방전관을 통하여 방전할 때 루프의 인덕턴스 및 비선형 저항으로 $L_2 = 3 \text{ nH}$, R_D 는 시간의 함수이다. C_1 은 59.4 nF , C_2 는 54 nF 이며, 방전 유효단면적은 $1.8 \text{ cm(H)} \times 1.2 \text{ cm(W)} \times 54 \text{ cm(L)}$ 이다.

III. 시뮬레이션 결과 및 검토

1. KrF 레이저 출력 특성

시뮬레이션 계산결과와 실험치를 비교하기 위해 본 계산에 사용한 파라메타는 K, Miyazaki 등⁽¹⁷⁾의 실험장치와 같다. 레이저 공진기는 CaF_2 window와 전반사경으로 구성되어 있으며, 공진기 길이는 90 cm 이다. CaF_2 재질은 파장 248 nm 에서 굴절률이 1.466 이고, 수직입사시 반사율은 약 7.14% 이다. 본 연구에서 사용한 혼합가스의 비율과 압력은 각각 $\text{He/Kr/F}_2 = \text{Ne/Kr/F}_2 = 98.3/1.6/0.1(\%)$, 4 atm 이다.

그림 3은 충전전압에 대한 레이저 출력의 변화를 표시한다. 계산결과와 실험치를 비교하기 위해 K, Miyazaki 등의 실험치와 같이 나타내었다. 비교적 잘 일치하는 것으로 판명되며, 계산에 의해 충전전압에 대한 여기밀도도 표시하였다. 충전전압 $16 \sim 36 \text{ kV}$ 는 여기밀도(방전관에 축적된 에너지(전압 \times 전류)/방전 유효체적) $1.8 \sim 3.5 \text{ MW/cm}^3$ 의 범위임을 알 수 있다.

그림 4는 충전전압 32 kV 에서 Ne Buffer와 He Buffer일 때의 방전전압, 여기밀도 및 레이저 출력을 나타냈다. He 버퍼에서 방전전압, 방전전류, 여기밀도 및 레이저 펄스 폭(FWHM)은 각각 22 kV , 55 kA , 5.3 MW/cm^3 및 30 ns 이고, Ne 버퍼에서 방전전압, 방전전류, 여기밀도 및 레이저 펄스 폭(FWHM)은 각각 19 kV , 62 kA , 3.1 MW/cm^3 및 30 ns 이다.

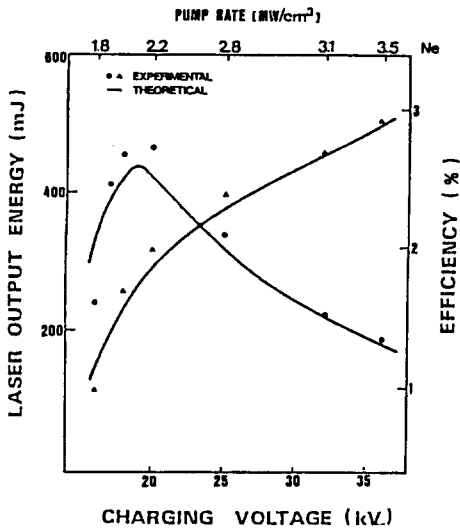


Fig. 3. Variation of the KrF laser output and the electrical efficiency. The excitation parameters are the same as these in the experiment in Ref.[17].

2. 반응속도상수

그림 5는 He/Kr/F₂계 및 Ne/Kr/F₂계의 이온화 여기의 반응속도상수를 나타냈다. He 완충가스에 비해 Ne 완충가스를 사용하였을 때 운동량 전달 단면적과 평균 전자에너지가 높기 때문에 반응속도상수가 He보다 큰 것을 알 수 있다. 그림 6은 He/Kr/F₂계의 초탄성충돌 반응속도상수를 나타낸다. 그림 5에서와 마찬가지로 He 완충가스를 사용하였을 때보다 Ne 완충가스로 사용하였을 때 반응속도상수가 약간 큰 것을 알 수 있다. 또한 그림 5와 비교하여 E/N 변화에 대하여 크게 변화하지 않는 것을 알 수 있다. 이는 초탄성충돌 과정의 전자 에너지가 수 eV 이하이므로, 전자분포 함수에서 수 eV 전자에너지 분포가 E/N 의 변화에 크게 변화하지 않기 때문이다.

3. KrF*의 형성, 탈여기 및 흡수채널

방전여기 KrF 레이저의 에너지 흐름을 파악하기 위한 KrF* 형성 채널은 He/Kr/F₂, Ne/Kr/F₂ 혼합가스에

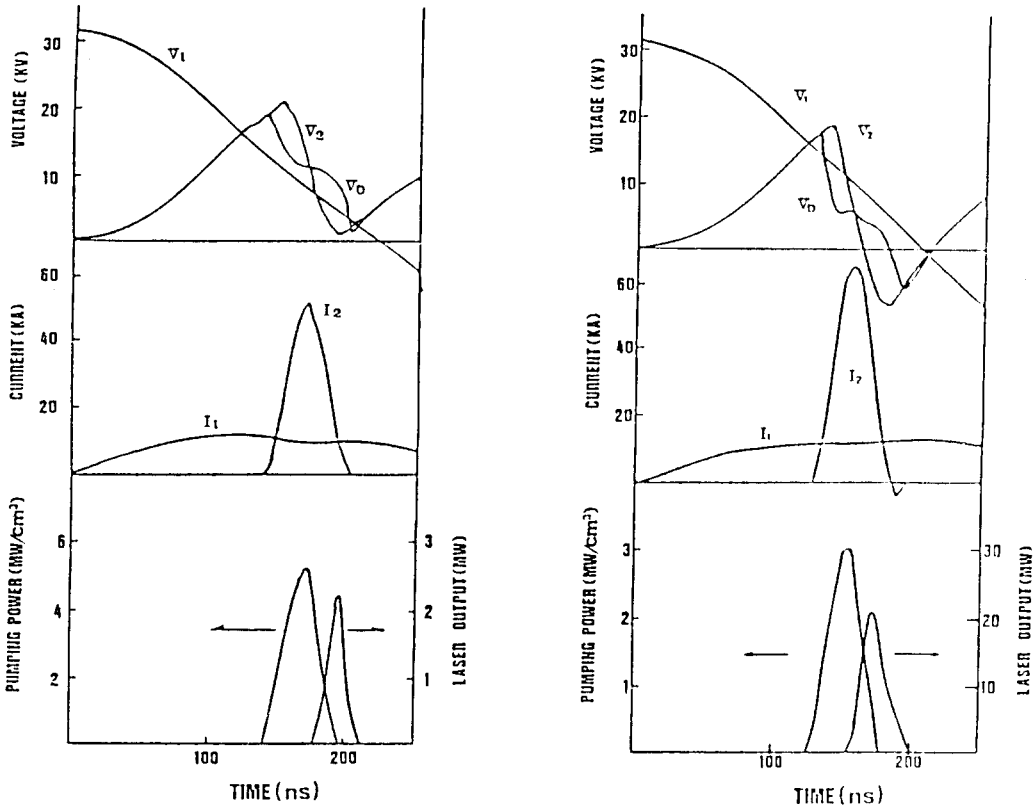


Fig. 4. Calculated temporal histories of the voltage, current, pumping density, and KrF laser output at a charging voltage of 32 kV (a) for the He diluent and (b) for the Ne diluent.

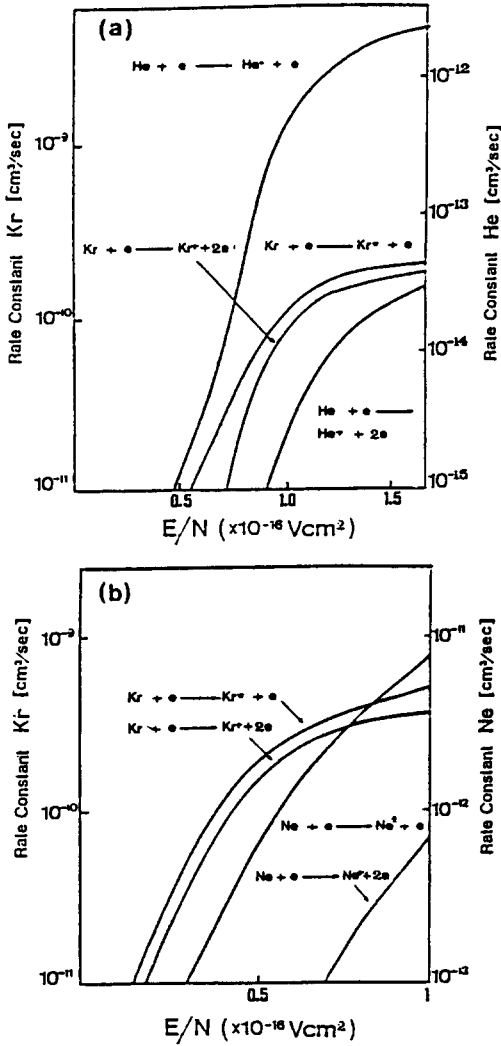


Fig. 5. Ionization and excitation rate constants for He, Ne, Kr.

서 그림 7과 같다. 그림에서 He 버퍼인 경우 $\text{Kr}^* + \text{F}_2$, $\text{Kr}^+ + \text{F}^-$ 의 반응기구에 의한 KrF^* 의 형성이 주된 것으로 충전전압이 증가함에 따라 이온반응에 의한 $\text{Kr}^+ + \text{F}^-$ 의 반응기구 비율이 커지는 것을 알 수 있다. 충전전압이 증가함에 따라 E/N 이 증가하고 E/N 의 증가에 의해 높은 전자에너지 분포가 증가하기 때문이며, 이 때의 여기밀도는 $4 \sim 6 \text{ MW/cm}^3$ 이다. 그러나 Ne 버퍼인 경우 $\text{Kr}^* + \text{F}_2$, $\text{Kr}^+ + \text{F}^-$, $\text{NeKr}^+ + \text{F}^-$ 의 반응기구에 의해 주로 KrF^* 가 생성되며, 여기밀도는 $1.8 \sim 3.5 \text{ MW/cm}^3$ 이다. 위의 두 그림에서 생성 효율(전체 KrF^* 형성 밀도수/충적에너지 $\times 100(\%)$)

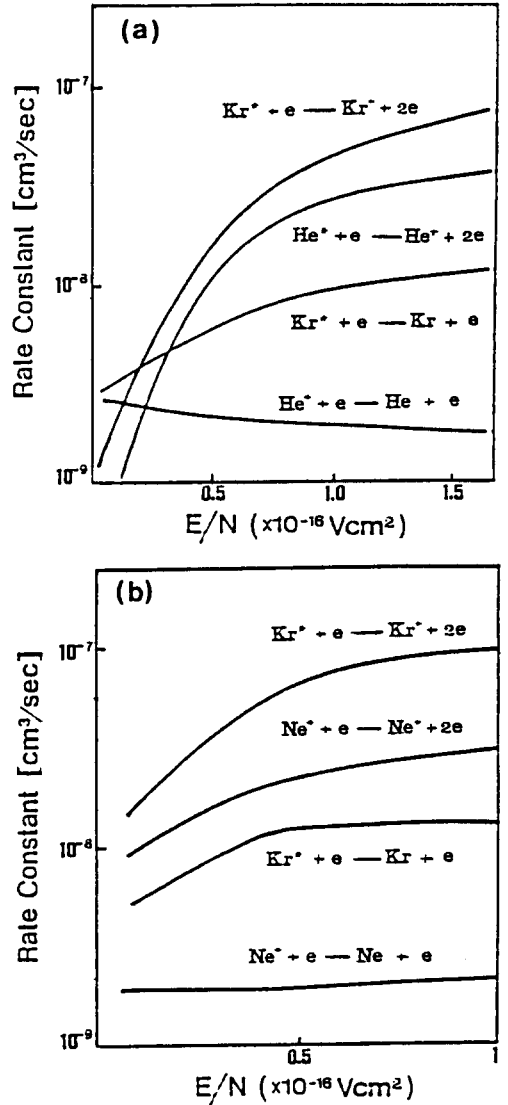


Fig. 6. Two step ionization and de-excitation rate constants for He*, Ne*, Kr*.

은 Ne일 때가 He일 때보다 2,3배 정도 크고, He과 Ne 버퍼에서 생성효율은 각각 7.5, 19%임을 알 수 있다. 또한 전자에너지가 불활성 기체의 내부에너지로 가스에 흡수되는 precursor 형성 채널은 전자에너지 분포에 크게 좌우되며, 희가스의 여기 및 이온화에 필요한 에너지와 전자에너지의 함수로써 반응속도상수가 결정된다. $\text{Kr} \rightarrow \text{Kr}^*$, $\text{Kr} \rightarrow \text{Kr}^+$, $\text{Ne} \rightarrow \text{Ne}^*$, $\text{Ne} \rightarrow \text{Ne}^+$, $\text{He} \rightarrow \text{He}^*$, $\text{He} \rightarrow \text{He}^+$ 에 필요한 에너지는 각각 9.9, 14, 16.6, 21.6, 19.8, 24.5 eV이다. 계산결과에서 KrF^*

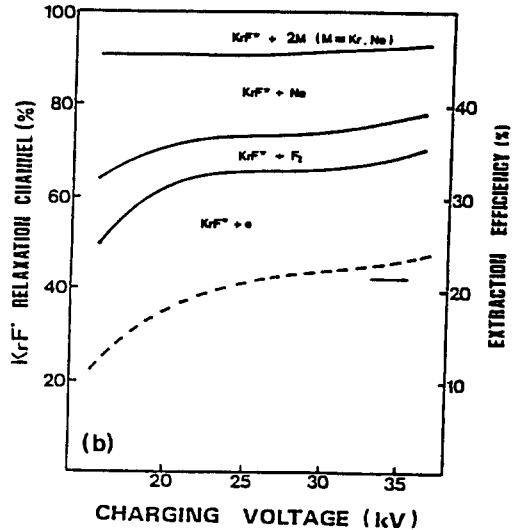
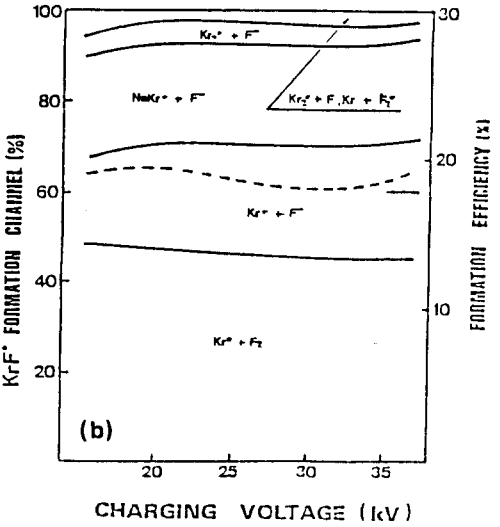
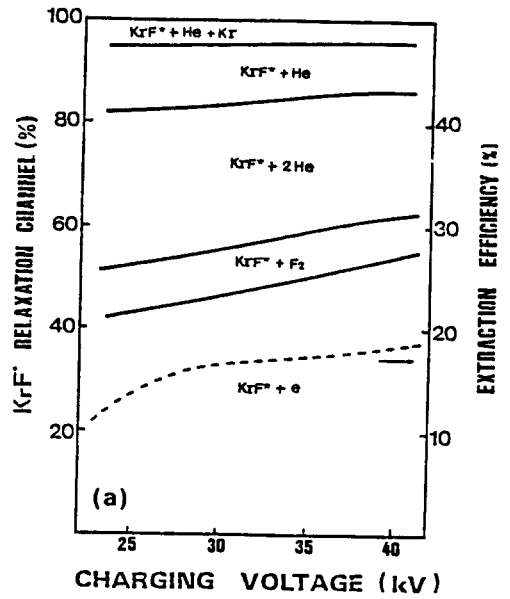
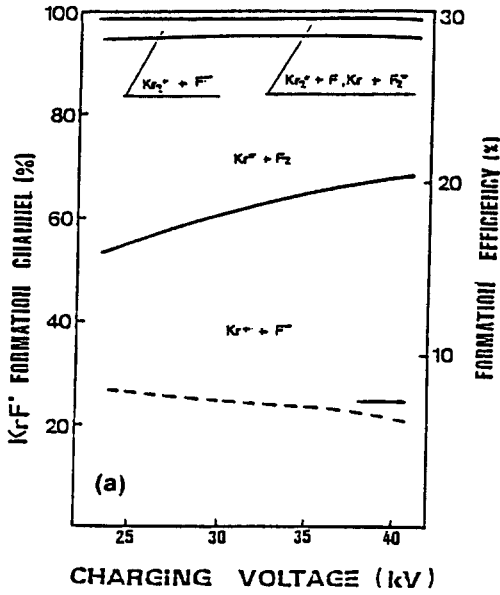


Fig. 7. Variations of the KrF* formation efficiency and the percent contribution of the KrF* formation channels with the charging voltage (a) for the He diluent and (b) for the Ne diluent.

Fig. 8. Variations of the percent contribution of the KrF* relaxation channels with the charging voltage (a) for the He diluent (b) for the Ne diluent.

형성에 기여하는 주된 반응기구는 비퍼가스보다는 $Kr + e \rightarrow Kr^* + e$, $Kr + e \rightarrow Kr^* + 2e$, $Kr^* + e \rightarrow Kr^* + 2e$ 임을 알 수 있었다.

그림 8은 충전전압의 변화에 의한 KrF*의 탈여기 반응채널을 표시한다. 그림에서 주된 탈여기는 전자에 의한 것이며, 충전전압이 증가함에 따라 전자수 밀도의 증가에 의해 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 또한 충전전압

30 kV, He 과 Ne 완충가스에서 완충가스에 의한 탈여기는 각각 45, 30%임을 알 수 있다. 그림 8에서 추출효율(레이저 출력/전체 KrF* 형성 밀도수 $\times 100$ (%))은 충전전압 32 kV에서 각각 17, 22%이다. 그러므로 형성효율 \times 추출효율(레이저 출력/축적에너지 $\times 100$ (%))은 각각 1.2, 4%이다.

계산결과 방전여기 KrF 레이저에서 완충가스에 의한 흡수는 상당히 작은 반면에, 도우너 가스로 사용한 F₂

및 F-에 의한 흡수가 지배적인 것을 알 수 있었다⁽¹⁸⁾.

IV. 결 론

본 연구실에서는 UV 예비 전리 방전여기 KrF 레이저의 포괄적인 레이저 시뮬레이션 모델을 개발하여 He/Kr/F₂와 Ne/Kr/F₂ 혼합가스에서 출력특성과 KrF* 생성, 탈여기 및 흡수반응기구의 변화에 대하여 연구하였다.

충전전압에 대한 출력의 변화는 계산결과와 실험치가 거의 일치하였으며, 이 때 여기밀도는 He 과 Ne 완충가스에서 각각 4~6 MW/cm³, 1.8~3.5 MW/cm³값이었다.

이온화, 여기 및 초탄성충돌 반응속도상수들은 He 완충가스에서보다 Ne 완충가스에서 큰 값을 갖는 것을 알 수 있었으며, 동일한 E/N 에서 높은 전자에너지 분포 또한 Ne 완충가스가 더 큰 것을 알 수 있었다.

KrF* 형성효율은 Ne 완충가스가 He 에서 보다 2.3 배 정도 높았으며, 탈여기 채널에서도 충전전압 30 kV 에서 Ne에 의해 30%, He에 의해 45% 탈여기되는 것을 알 수 있었다. 그러나 흡수채널에서는 완충가스의 영향이 크지 않은 것을 확인할 수 있었다.

결론적으로 방전여기 UV 예비전리 KrF 레이저의 완충가스로서 He 보다는 Ne 이 고 효율, 대출력에 유리하며, He에서의 거의 절반수준인 낮은 여기밀도 1.8-3.5 mW/cm³에서 1.3% 이상의 효율이 얻어짐을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] D. G. Sutton, S. N. Suchard, O. L. Gibb, and C. P.

Wang, Appl. Phys. Lett., **28**, 522 (1976).
 [2] A. E. Greene and C. A. Brau, IEEE J. Quantum Electron., **QE-14**, 951 (1978).
 [3] S. Karasawa and M. Shimauchi, J. Spectroc. Soc. Japan., **28**, 308 (1979).
 [4] T. Mizunami, M. Maeda, O. Uchine, O. Shimomura, and Y. Miyazoe, Rev. Laser Eng., **9**, 527 (1981).
 [5] M. Maeda, A. Takahashi, T. Mizunami, and Y. Miyazoe, Jpn. J. Appl. Phys., **21**, 1161 (1982).
 [6] T. H. Johnson, L. J. Palumbo, and A. M. Hunter II, IEEE J. Quantum Electron., **QE-15**, 289 (1979).
 [7] B. Y. Choi, J. K. Jeong, and C. H. Lee, Trans. KIEE, **38**(10), 788 (1989).
 [8] D. Ton-That and M. R. Flannery, Phys. Rev., **A15**, 517 (1977).
 [9] D. Rapp and P. Englander Golden, J. Chem. Phys., **43**, 1464 (1965).
 [10] M. Hayashi and T. Nimura, J. Appl. Phys., **54**(9), 4879 (1983).
 [11] R. C. Sze and T. R. Loree, IEEE J. Quantum Electron., **QE-14**, 944 (1978).
 [12] J. Hisa, Appl. Phys. Lett., **30**(2), 101 (1977).
 [13] B. A. Lengyel, Introduction to Laser Physics, Wiley and sons, New York (1966).
 [14] B. Y. Choi, J. K. Jeong, and C. H. Lee, 88 KIEEJ annual conference international sessions, 298 (1988).
 [15] C. A. Brau and J. J. Ewing, J. Chem. Phys., **63**, 4640 (1975).
 [16] J. R. Murray and H. T. Powell, Appl. Phys. Lett., **29**, 252 (1976).
 [17] K. Miyazaki, T. Hasama, K. Yamada, T. Fukatsu, T. Eura, and T. Sato, J. Appl. Phys., **60**(8), 2721 (1986).
 [18] B. Y. Choi and C. H. Lee, 5th Conference on Waves and Lasers, 3 (1990).

Theoretical Analysis of Buffer Gas Effects of a Discharge Excited KrF Laser

B. Y. Choi and C. H. Lee

Department of Electronic Engineering Kyung Hee University

(Received; February 10, 1990)

By developing a computer simulation code for discharge excited KrF excimer laser, we analyzed mainly the effects of buffer gas for the KrF* formation, the KrF* relaxation, and the absorption of the laser radiation. The KrF* formation efficiency were found to be 7.5%, 19% and the KrF* relaxation kinetic reactions were found to be 45%, 30% at the charging voltage of 30 KV and He, Ne buffer gas, respectively. But the absorption of the 248 nm laser radiation were less than 10% by the buffer gas.